Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 21, No. 4, Winter 2024, p. 403-418

Improvement of Functional, Morphological, and Physiological Traits of Camelina (*Camelina sativa*) Using Iron Nanoparticle and Putrescine Sprying

N. Rezaiean[1], M. Gerami[2], H. Ghorbani[3*], P. Majidian[3]

1- M.Sc. graduted, Horticultural Science- Medicinal plants, Sana Institute of Higher Education, Sari, Iran
2- Associate Professor, Biology Department, Sana Institute of Higher Education, Sari, Iran
3- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran
(*- Corresponding Author Email: h.ghorbani@areeo.ac.ir)

Received: 26 March 2023 Revised: 30 July 2023 Accepted: 05 August 2023	**How to cite this article:** Rezaiean, N., Gerami, M., Ghorbani, H., & Majidian, P. (2024). Improvement of Functional, Morphological, and Physiological Traits of Camelina (*Camelina sativa*) Using Iron Nanoparticle and Putrescine Sprying. *Iranian Journal of Field Crops Research, 21*(4), 403-418. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.81692.1237

Introduction

Applying innovative nanotechnology in agriculture is considered as one of the promising approaches to obtain significant increases of crop yield. Nanoparticles (NPs) are considered potential agents for agriculture as fertilizers and growth enhancers and using of nano-fertilizers has led to an increasing in the efficiency of nutrients, the correct management of fertilizer consumption, and a reduction of the frequency of fertilizer application. Stimulants are compounds that initiate signals for cells to increase or decrease the production of secondary metabolites and plant defense response. Stimulants such as Putrescine play a role in regulating various plant physiological processes. In this regard, considering the importance of using new technologies, including nanotechnology, in sustainable agriculture to increase the quantitative and qualitative performance of agricultural products, especially oil-medicinal plants, and the lack of sufficient information about the use of iron nanoparticles and polyamine putricine in Camelina plant nutrition, The effect of foliar spraying of these stimulants on functional, morphological and physiological traits of Camelina plant (Soheil veriety) was evaluated.

Materials and Methods

This research was conducted as factorial layout based on a randomized complete block design with three replications at the research fields of Baye-Kala Agricultural Research Station (BARS) at Neka city in 2021. The studied factors included iron nanoparticles in four concentrations (0, 20, 40, and 60 ppm) and polyamine putrescine in four concentrations (0, 0.5, 1, and 1.5 mM). Each experimental plot was prepared in 6 square meters area and the studied treatments were applied by foliar spraying at the beginning of the reproductive phase of the plant. Two weeks after applying the treatments, sampling was done to evaluate the different traits of the plant. After checking the normality of the data, they were analyzed with SAS (ver 9.1) software; obtained averages compared with using Duncan Test at the 5% probability level.

Results and Discussion

The results of variance analysis indicated the significance of the simple effect of iron nanoparticles and putrescine on all the studied traits at the 5% level, as well as the significance of the interaction of the two factors on all the studied traits except carotenoid and peroxidase in the reproductive stage at the 5% level. According to the results, the highest amount of carotenoid (0.142 and 0.141 $mg.g^{-1}$, respectively) and peroxidase (4.96 and

https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.81692.1237

4.38 mg.g^{-1}, respectively) were observed in application of 60 ppm iron nanoparticles and 1.5 mM putrescine which had no statistically significant difference with the concentration of 40 ppm iron nanoparticles and 1 mM putrescine. The results indicated that the highest amount of flavonoid (40.72 mg.g^{-1}), soluble sugar (139.27 mg.g^{-1}), and plant height (115.75 cm) were observed in the treatment combination of 60 ppm iron and 1 mM putrescine, the highest percentage of oil (41.76) and protein (27.77) were observed in the treatment combination of 40 ppm iron and 1.5 mM putrescine and the highest amount of grain yield (210.27 g) and morphological components of yield were observed in the treatment combination of 40 ppm iron and 1 mM putrescine. The correlation result showed that there were the most positive and significant correlation values among the physiological traits and the yield trait had a positive and significant correlation with plant dry weight (0.44) and oil percentage (0.40).

Conclusion

The results have demonstrated that foliar application of 40 ppm iron nanoparticles and 1.5 mM putrescine significantly enhanced various growth characteristics, including photosynthetic pigment content, crude protein, oil content, as well as the physiological and morphological aspects of Camelina. Additionally, the application of iron nanoparticles and putrescine via a uniform supply of low-consumption nutrients has been shown to strengthen the plant's defense system, ultimately leading to improvements in the growth, development, and yield of the medicinal-oil Camelina plant.

Keywords: Correlation, Oilseed, Pigment, Microelement, Stimulant

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۱، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۲، ص ٤۱۸-٤۰۳

بهبود صفات عملکردی، مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی کاملینا (*Camelina sativa*) با استفاده از محلول‌پاشی نانوذرات آهن و پوتریسین

نجمه رضائیان[۱]، مهیار گرامی[۲]، حمیدرضا قربانی[۳*]، پرستو مجیدیان[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۴

چکیده

این پژوهش به‌منظور بررسی اثر محلول‌پاشی نانوذرات آهن و پوتریسین بر گیاه کاملینا، به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی بایع‌کلا (نکا) در سال ۱۴۰۰ انجام شد. فاکتورها شامل نانوذرات آهن (غلظت‌های صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ قسمت در میلیون) و پوتریسین (غلظت‌های صفر، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌مولار) بود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین مقدار کارتنوئید در سطح ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و سطح ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین بود. بیشترین رنگیزه‌های کلروفیل b و کل، فلاونوئید (۴۰/۷۲ میلی‌گرم در گرم)، قند محلول (۱۳۹/۲۷ میلی‌گرم در گرم) و ارتفاع بوته (۱۱۵/۷۵ سانتی‌متر) در ترکیب ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱ میلی‌مولار پوتریسین، بیشترین درصد روغن (۴۱/۷۶) و پروتئین (۲۷/۷۷) در ترکیب تیماری ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین و بیشترین عملکرد دانه (۲۱۰/۲۷ گرم در متر مربع)، تعداد دانه در کپسول و نیز میزان قابل‌توجه وزن هزار دانه و ارتفاع بوته در ترکیب تیماری ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱ میلی‌مولار پوتریسین مشاهده شد. همبستگی صفات نشان داد که بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار میان صفات فیزیولوژیکی بوده و صفت عملکرد همبستگی مثبت و معنی‌داری با وزن خشک بوته (۰/۴۴) و درصد روغن (۰/۴۰) داشت. به‌طورکلی برهم‌کنش سطوح افزایشی نانوذرات آهن و پوتریسین نتایج مطلوبی را داشته و ترکیب تیماری ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین بهترین مقادیر صفات مورد مطالعه را نشان داده و محلول‌پاشی محرک‌ها، موجب بهبود رشد، نمو و عملکرد کاملینا شد.

واژه‌های کلیدی: دانه روغنی، رنگیزه، عنصر کم‌مصرف، محرک رشد، همبستگی

مقدمه

یکی از مهم‌ترین کاربردهای فناوری نانو، استفاده از نانوکودها جهت تغذیه گیاهان است. با بهره‌گیری از نانوکودها، عناصر غذایی به آرامی و با سرعتی مناسب در تمام فصل رشد گیاه آزاد می‌شود و به دلیل کاهش آب‌شویی، گیاهان قادر به جذب بیشتر عناصر خواهند بود و آلودگی‌های زیست‌محیطی کاهش می‌یابد (Chinnamuthu & Boopathi, 2009). استفاده از نانوکودها منجر به افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی، کاهش سمیت خاک، به حداقل رسیدن اثرهای منفی ناشی از مصرف بیش از حد کود و کاهش تعداد دفعات کاربرد کود می‌شود (Naderi & Abedi, 2012). فناوری نانو با تغییر و اثرگذاری در فرمولاسیون کودها و تولید موادی با ویژگی‌های مناسب می‌تواند نقش مهمی در افزایش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی ایفا کند (Hiyasmin Rose *et al.*, 2015). پوشاندن و سیمانی کردن کودها با ذرات نانو و کوچک‌تر از نانو، باعث ایجاد قابلیت تنظیم رهاسازی عناصر غذایی از کپسول کودی می‌شود که این موضوع باعث می‌شود تا عناصر غذایی را به‌صورت منظم رهاسازی نموده و از تثبیت کلی آن جلوگیری نماید (Torabian & Zahedi, 2013). آزمایش‌هایی که روی روش‌های مصرف آهن در گندم (*Triticum aestivum* L.) در خاک آهکی انجام گرفت، نشان داد که محلول‌پاشی آهن موجب ایجاد بالاترین غلظت و جذب آهن در اندام

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، باغبانی- گیاهان دارویی، موسسه آموزش عالی سنا ساری، ایران
۲- دانشیار، بخش زیست‌شناسی، موسسه آموزش عالی سنا ساری، ایران
۳- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: h.ghorbani@areeo.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.81692.1237

هوایی می‌شود (Demirkiran, 2005). بر اساس یافته‌های پژوهشگران محلول‌پاشی با عناصر ریزمغذی نانو کلات آهن باعث جذب موثرتر عنصرهای غذایی در برگ‌ها و انتقال به سایر اندام‌های گیاه می‌شود (Srivastava *et al.*, 2017). بر این اساس استفاده از نانو کود کلات آهن می‌تواند به‌عنوان منبعی غنی و قابل‌اعتماد از آهن دو ظرفیتی برای گیاهان محسوب شود (Sozer & Kokini, 2008). در بین عناصر ریزمغذی، آهن نقش کلیدی در تشکیل کلروفیل و فتوسنتز داشته و از اهمیت زیادی در سیستم آنزیمی و تنفس گیاهان برخوردار می‌باشد. بنابراین کاربرد آن اثر مثبت بر تولید ماده خشک گیاه خواهد داشت. در مقابل از مهم‌ترین اثرهای کمبود آهن، کاهش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی است که نتیجه آن افزایش نسبی کارتنوئیدها در مقایسه با کلروفیل بوده که در نهایت سبزینگی برگ‌ها و توان فتوسنتزی آن‌ها را کاهش می‌دهد (Briat, Curie, & Gaymard, 2007). در بعضی موارد کاهش فتوسنتز ناشی از کاهش کلروفیل سبب بازدارندگی کامل از تشکیل برگ‌های جدید و در نتیجه کاهش محصول گیاه می‌شود (Mohamadipoor, Sedaghathoor, & MahboubKhomami, 2013). آهن در فرآیندهای اکسیداسیون و احیا نقش دارد و با تغییر ظرفیت سبب انتقال الکترون می‌شود که این نقش در متابولیسم گیاهی بسیار مهم است. وجود آهن در سنتز پروتئین لازم است و از آن‌جایی‌که نقش عمده آهن در سنتز پروتئین‌های همراه کلروفیل است کمبود آن ساختار کلروپلاست و میزان فتوسنتز را کاهش می‌دهد (Briat, Dubos, & Gaymard, 2015). آزمایش‌ها نشان داده است که جایگزینی کود آهن تهیه شده با فناوری نانو در مقایسه با کودهای آهن رایج در غلظت مناسب یا حتی کمتر می‌تواند سبب افزایش رشد گیاه ریحان (*Ocimum basilicum*) شود (Bakhtiari, Moaveni, & Sani, 2015). از نظر محققین استفاده از نانوذرات اکسید آهن در گیاهان کارآمدتر از کودهای معمولی است. احتمالاً خصوصیات ذرات نانو، حلالیت بیشتر ذرات نانو و سطح تماس بیشتر ذرات نانو با ریشه گیاهان علت این امر است. در مطالعه بر روی گندم مشاهده شد تیمار آهن باعث افزایش معنی‌دار حجم کلروفیل کل، نشاسته و پروتئین شده است (Armin, Akbari, & Mashhadi, 2014). الیسیتورها، ترکیبات یا موجودات زنده‌ای هستند که آغازکننده پیام‌هایی برای سلول‌ها در جهت افزایش یا کاهش تولید متابولیت‌های ثانویه و پاسخ دفاعی گیاه می‌باشند. در گیاهان عالی، پلی‌آمین‌ها به‌طور عمده به شکل آزاد وجود دارند. پوترسین، اسپرمیدین و اسپرمین اصلی‌ترین پلی‌آمین‌ها در گیاهان بوده و در تنظیم فرآیندهای مختلف فیزیولوژیکی (Mustafavi, Badi, Sekara, & Al, 2018) مانند رشد گیاهان، جنین‌زایی، پیری، بلوغ، رشد میوه و همچنین در پاسخ به تنش‌های زنده و غیرزنده نقش دارند (Reis, Vale, Heringer, & Al, 2016). اهمیت پلی‌آمین‌ها در رویارویی با تنش‌ها می‌تواند به دلیل نقش آن‌ها در تنظیم اسمزی، حفظ و پایداری غشاء، کاهش نشت یونی و پاک‌سازی‌کننده رادیکال‌های آزاد و گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر از محیط سلول‌ها باشد (Liu, Wang, Wu, Gong, & Moriguchi, 2015). مکانیسم فیزیولوژی پلی‌آمین‌ها در شرایط تنش به‌درستی شناخته نشده اما به دلیل خاصیت پلی‌کاتیونی می‌توانند با اتصال به ماکرومولکول‌های آنیونی شامل فسفولیپیدها، اسیدهای نوکلئیک و پروتئین‌ها موجب پایداری غشا و ساختارهای ماکرو مولکولی سلول‌ها شده (Alcázar *et al.*, 2006) و به‌عنوان یک کاهش‌دهنده موثر گونه‌های فعال اکسیژن عمل کنند (Mahros, Badawy, Mahgoub, Habib, & El-Sayed, 2011). پلی‌آمین‌ها در محافظت از غشای سلولی و کاهش تنش اکسایشی نقش دارند و کاربرد خارجی پلی‌آمین‌ها منجر به افزایش ثبات و یکپارچگی غشای سلولی در گیاهان می‌شود (Gill & Tuteja, 2010). گزارشی مبنی بر این‌که کاربرد پوترسین باعث تأخیر پیری و کاهش از دست دادن کلروفیل می‌گردد، وجود دارد (Couée, Hummel, Sulman, Gouesbet, & El-Amrani, 2004). کاربرد خارجی پوترسین باعث القای داخلی سیتوکنین می‌شود که باعث تحریک بیوسنتز کلروفیل و تمایز کلروپلاست در گندم گردید (El-Bassiouny *et al.*, 2008 و Xie, Jiag, Dai, Jing, & Cao, 2004). استفاده از پوترسین به‌طور قابل‌توجهی محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، b و کل) را در برگ گندم افزایش داد (El-Bassiouny *et al.*, 2008). اثر پوترسین در افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی در توت (*Morus alba* L.) (Das, Sengupta, Chattopadhyay, Setua, & Das, 2002)، خیار (*Cucumis sativus* L.) (He, Nada, & Tachibana, 2002) و لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) (Nassar, El-Tarabily, & Sivasithamparam, 2003) گزارش شده است. می‌توان گفت کاربرد پلی‌آمین‌ها موجب حفظ پایداری غشاهای کلروپلاستی و مانع تجزیه کلروفیل می‌شوند. پلی‌آمین‌ها با اتصال یونی به غشای تیلاکوئید سبب حفظ غشا شده و به این ترتیب پلی‌آمین‌ها به‌طور غیرمستقیم در حفظ فتوسنتز دخالت دارند (Jalil-Marandi, 2011). گیاه دارویی-روغنی کاملینا با نام علمی *Camelina sativa* L. یکی از قدیمی‌ترین گیاهان زراعی خانواده براسیکاسه می‌باشد و تاریخچه کشت آن به ۴۰۰۰ سال پیش بر می‌گردد (Akk & Ilumae, 2005). بذر کاملینا حاوی ۳۸ تا ۴۳ درصد روغن و ۲۷ تا ۳۲ درصد پروتئین می‌باشد. علاوه بر مصرف خوراکی این گیاه، با توجه به کیفیت بالای امگا-۳ (تا ۵ درصد)، میزان بالای پروتئین و روغن و میزان کالری بالا به‌عنوان خوراک مناسب در رژیم غذایی چهارپایان، پرندگان و ماهیان نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Berti, Gesch, Eynck, Anderson, & Cermak, 2016). وجود مقدار بالای الفا اسید لینولنیک (امگا ۳)، توکوفرول‌ها و سایر آنتی‌اکسیدان‌ها در روغن کاملینا با توجه به نقش این ترکیب‌ها در سلامت انسان، روغن کاملینا

را به‌عنوان یک منبع ارتقادهنده سلامتی از نظر تغذیه‌ای مورد توجه قرار داده است (Ibrahim & El-Habbasha, 2015). در این راستا، با توجه به اهمیت استفاده از فناوری‌های نوین از جمله نانوتکنولوژی در کشاورزی پایدار جهت افزایش عملکرد کمی و کیفی محصولات کشاورزی، به‌خصوص گیاهان روغنی-دارویی و عدم اطلاع کافی از کاربرد نانو ذرات آهن و پلی‌آمین پوتریسین در تغذیه گیاه کاملینا، اثر محلول‌پاشی این محرک‌ها بر صفات عملکردی، مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه کاملینا ارزیابی شد.

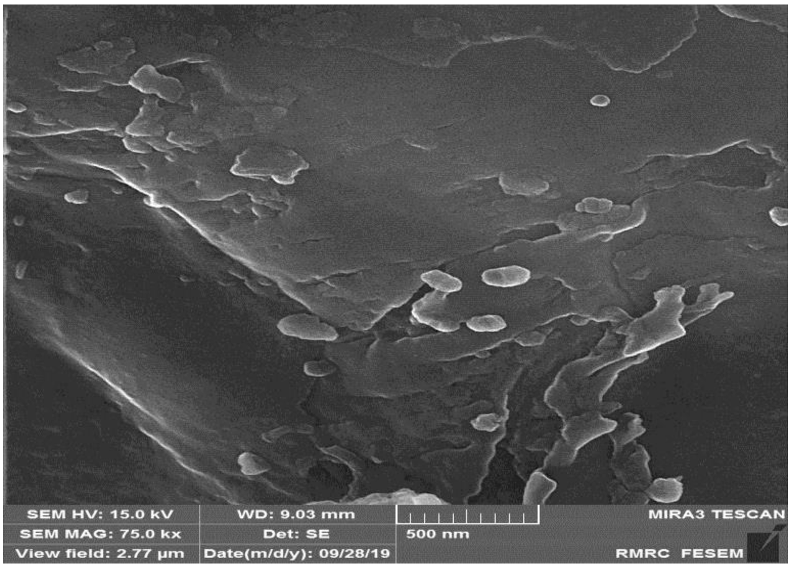
مواد و روش‌ها

این آزمایش در مزارع تحقیقاتی ایستگاه تحقیقات کشاورزی بایع‌کلا (مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران) واقع در شهرستان نکا در سال زراعی ۱۴۰۰ به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح پلی‌آمین پوتریسین (غلظت‌های صفر، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌مولار) از شرکت سیگما (Sigma) و ۴ سطح نانواکسید آهن Fe_2O_3 (غلظت‌های صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ قسمت در میلیون) (شکل ۱) بود. نانوذرات اکسید آهن به‌صورت سوسپانسیون و با ذراتی به‌صورت کروی شکل، با ٪۹۸ خلوص و تولید به روش احتراق در دمای بالا از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه و جهت محلول‌پاشی آن از آب استفاده شد. آماده‌سازی زمین و عملیات کاشت طبق عرف منطقه اعم از شخم، دیسک زدن، کوددهی و غیره انجام شد. بذر رقم سهیل کاملینا از بانک بذر مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران تهیه شد و در کرت‌های آزمایشی به مساحت شش متر مربع به‌صورت دستپاش و با تراکم چهار کیلوگرم در هکتار کاشته و اعمال تیمارهای مورد مطالعه به‌صورت محلول‌پاشی و در شروع فاز زایشی گیاه (آغاز گلدهی بر روی بوته‌ها در سطح کرت در اواخر اسفند ماه) انجام گرفت. دو هفته بعد از اعمال تیمارها، نمونه‌گیری جهت بررسی ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه شامل محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، کارتنوئید، محتوای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز، پراکسیداز، قند محلول، سنجش فلاونوئید انجام شد. اندازه‌گیری میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در برگ تازه گیاه کاملینا از طریق روش آرنون (Arnon, 1949) انجام شد. پس از تهیه نمونه‌ها، جذب محلول با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Uv/Vis S-2150 شرکت UNICO) در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۳ و ۴۸۰ نانومتر اندازه‌گیری و برای شاهد نیز از استون ٪۸۰ استفاده گردید. مقدار کلروفیل‌ها بر حسب میلی‌گرم بر گرم محاسبه و همچنین برای اندازه‌گیری کارتنوئید از روش لیچستنالر (Lichtenthaler, 1987) استفاده شد. در زمان رسیدگی به‌منظور محاسبه عملکرد دانه و زیست‌توده، بعد از حذف اثر حاشیه‌ای، برداشت در سطح یک متر مربع صورت گرفت و عملکرد نهایی دانه و زیست‌توده محاسبه گردید. همچنین به‌منظور اندازه‌گیری سایر صفت‌های زراعی از هر واحد آزمایشی تعداد ۵ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و صفات ارتفاع بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه مورد بررسی قرار گرفت. بعد از رسیدگی گیاه، میزان درصد روغن و پروتئین دانه اندازه‌گیری شد. برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز از روش لوک (Luck, 1974) و سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز از روش این و همکاران (In, Motomura, Inamoto, Doi, & Mori, 2007) استفاده شد. اندازه‌گیری قند با اندازه‌گیری به‌وسیله آنترون بر طبق روش مک‌کردی و همکاران (McCready, Guggolz, Silviera, & Owens, 1950) انجام پذیرفت. مقدار فلاونوئید کل با روش کالری‌متری آلومینیوم کلراید اندازه‌گیری شد (Du, Li, Ma, & Liang, 2009). استخراج روغن توسط حلال هگزان با استفاده از دستگاه سوکسله (Kenneth, 1990) و سنجش میزان پروتئین با روش بردفورد (Bradford, 1976) انجام شد. پس از بررسی و اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، تجزیه واریانس داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس داده‌های حاصل از آزمایش بیانگر معنی‌داری اثر ساده نانوذرات آهن بر تمام صفات مورد مطالعه به‌جز ارتفاع و وزن خشک بوته و نیز معنی‌داری اثر پوترسین (جدول ۱) بر تمام صفات مورد مطالعه در سطح ۵ درصد بود. همچنین برهم‌کنش نانوذرات آهن و پوتریسین بر تمامی صفات مورد مطالعه به‌جز صفات کارتنوئید و پراکسیداز در سطح پنج درصد معنی‌دار بود.

نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش تیمارها بر صفات فیزیولوژیکی در گیاه کاملینا نشان داد که در میان تیمارهای برهم‌کنش نانوذرات آهن و پوترسین، بیشترین غلظت قند محلول در ترکیبات تیمار ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن با ۱ میلی‌مولار پوتریسین و ترکیب ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن با ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین، ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن با ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین به‌ترتیب با میزان افزایش ۵۲/۴، ۴۹/۹ و ۴۸/۰ درصد نسبت به شاهد بوده و اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۳). در کلروپلاست دارای کمبود آهن سرعت جذب CO_2 فتوسنتزی به دلیل کاهش در ظرفیت فتوشیمیایی کاهش می‌یابد. کاهش کلروفیل و صدمه به انتقال الکترون فتوسنتزی موجب کاهش قندها و کاهش رشد می‌شود (Marschner, 1995). مصرف برگی عناصر ریز مغذی به دفعات متعدد، ضمن رفع کمبود آن‌ها سبب افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاه نیز می‌شوند (Mosavi, Galavi, & Ahmadvand, 2007).



شکل ۱- تصویر و اندازه نانو ذرات آهن به روش SEM. خلوص نانو اکسید آهن آلفا: ٪۹۸. روش تولید نانو اکسید آهن: به روش احتراق در دمای بالا

Figure 1- Image and Size of Fe nanoparticles by SEM. Iron Oxide Fe_2O_3 Nanopowder/ Nanoparticles Purity: 98%. Iron Oxide Fe_2O_3 Nanopowder/ Nanoparticles Making Method: High-Temperature Cumbustion Method

بررسی برهم‌کنش تیمارهای نانوذرات آهن و پوترسین بر غلظت فلاونوئید نشان داد که بیشترین غلظت فلاونوئید را ترکیب تیماری ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱ میلی‌مولار پوتریسین به میزان ۴۰/۷۲۶ میلی‌گرم بر گرم (۸۰/۶ درصد افزایش نسبت به شاهد) به خود اختصاص داد که با تمام ترکیبات به‌جز ترکیب تیماری ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۳). نتایج آزمایش برومند سیویری و همکاران (Bromand-sivieri, Heydari, Gholami, & Ghorbani, 2021) نشان داد که مصرف هم‌زمان محلول‌پاشی نانواکسید آهن و کودهای زیستی توانست سبب افزایش میزان فلاونوئید در سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) شود. با افزایش غلظت نانو اکسید آهن از سطح شاهد به سه کیلوگرم نانواکسید آهن در هزار لیتر آب بر میزان فلاونوئید افزوده شد. همچنین با بررسی اثر نانواکسید آهن بر نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) بیان شد که با افزایش غلظت نانواکسید آهن، میزان فلاونوئید برگ افزایش می‌یابد (Mohammadi, Majnoun Hosseini, & Dashtaki, 2016). جعفرپور و همکاران (Jafarpour, Bakhshi, Ghasem nejhad, & Hassan Sajedi, 2014) گزارش نمودند که گلچه‌های تیمارشده با ۱/۵ میلی‌مولار پوترسین میزان فلاونوئید کل بیشتری داشته و از لحاظ آماری با غلظت ۱ و ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین اختلاف معنی‌داری را نشان نداده‌اند. این غلظت از پوترسین با جلوگیری از تخریب کلروفیل و حفظ ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، پیری گلچه‌های کلم بروکلی (*Brassica oleracea* L.) را به تأخیر انداخت. فلاونوئیدها دارای خاصیت خنثی‌کنندگی رادیکال‌های آزاد می‌باشند (Van Acker, Tromp, Haenen, Van Der Vijgh, & Bast, 1995). ورما و میشرا (Verma & Mishra, 2005) بیان داشتند که پوترسین قادر است با کم کردن میزان پراکسید هیدروژن نقش آنتی‌اکسیدانی در گیاه داشته باشد.

با بررسی نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثر ساده تیمارهای نانوذرات آهن و پوتریسین بر صفات فیزیولوژیکی در گیاه کاملینا نشان داده شد که بالاترین غلظت کاتالاز در ترکیبات تیماری ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن با ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین و ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن با ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین با میزان ۹۵/۹ و ۸۶/۷ درصد افزایش نسبت به شاهد، اختلاف آماری معنی‌داری با همدیگر نداشتند. آنزیم کاتالاز و سایر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از سلول در برابر اثرهای H_2O_2 محافظت می‌کنند و نقش مهمی در افزایش مقاومت به تنش اکسیداتیو را بر عهده دارند (Mittler, 2002; Willekens *et al*., 1997). کاربرد نانوذرات آهن با توجه به این‌که گیاه را از کمبود تغذیه ناشی از تنش محافظت می‌کند، می‌تواند به سیستم دفاعی گیاه در جهت مقابله با تنش کمک کند. آهن به‌عنوان یک کاتالیزور در واکنش‌ها عمل نموده و موجب تسریع واکنش‌ها می‌شود.

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر القاگرهای نانوذرات آهن و پوترسین بر صفات گیاه کاملینا

Table 1- Analysis of variance of the effect of iron nanoparticles and putricine on traits of Camelina

منبع S.O.V.	درجه آزادی D.F.	Mean of square میانگین مربعات														
		درصد پروتئین % Protein	درصد روغن % Oil	عملکرد Yield	وزن خشک بوته dry weight	دانه در کپسول Seed per capsule	وزن هزار دانه 1000 seed weight	ارتفاع Height	کاروتنوئید Carotenoid	کلروفیل کل Total Chl	کلروفیل b Chl b	کلروفیل a Chl a	پراکسیداز Peroxidase	کاتالاز Catalase	قند محلول Soluble sugar	فلاونوئید Flavonoid
نانوذرات آهن Fe N.P.	3	3.26*	4.52*	4230.89*	13261.1*	17.13*	0.026*	21.29ns	0.0019*	0.297*	0.14*	0.03*	9.29*	0.492*	156.39*	221.03*
پوترسین Putrescine	3	0.97*	6.81*	3604.13*	59717.7*	11.08*	0.035*	249.01*	0.0016*	0.104*	0.05*	0.01*	3.15*	0.506*	112.54*	213.65*
تکرار Rep	2	14.18*	40.57*	950.74ns	3623.9ns	0.19ns	0.004*	0.47ns	0.0002ns	0.011ns	0.01ns	0.001ns	0.09ns	0.014ns	133.01ns	9.29ns
نانوذرات آهن × پوترسین Fe N.P.× Putrescine	9	4.70*	9.50*	3636.23*	81137.9*	8.14*	0.006*	111.89*	0.0007ns	0.017*	0.013*	0.001*	0.25ns	0.077*	115.43*	21.97*
خطا Error	30	0.24	0.44	1039.64	21660.7	2.231	0.002	35.73	0.0009	0.0069	0.006	0.0004	0.49	0.034	51.22	7.538
ضریب تغییرات٪ % C.V.		18.0	11.7	19.4	19.4	11.4	14.6	15.6	17.6	17.3	15.3	16.4	18.1	14.4	16.1	14.6

ns, *, **: non significant, significant at 5 and 1 percentage respectively

ns، * و **: به‌ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح ۵ و ۱ درصد

آزاد و همکـــاران (Azad, Fakheri, Mahdinejhad, & Parmoon, 2018) با بررسی اثر تنش خشـکی و نـانوکلات آهـن در گیاه بابونه (*Matricaria Chamomilla* L.) بیان داشتند که هـر دو عامل مورد مطالعه سبب افزایش بیان کاتالاز و پراکسیداز در گیاه شده که در نتیجه کنش‌های گیاه در مقابله با اثرهای اکسـیداتیوی تـنش و اثرهای محافظتی آنزیم‌ها می‌باشـد. گرامـی و همکـاران (Gerami, Mohammadian, & Akbarpour, 2019) گـزارش نمودنـد کـه مقادیر آنزیم کاتالاز و پراکسیداز بـا افـزایش سـطوح پوترسین رونـد صعودی معنی‌داری را داشت. همچنین مقایسه میـانگین بـرهم‌کـنش پوترسین و اسید سالیسیلیک نشان داد که در سـطح ۰/۵ میلـی‌مـولار اسید سالیسیلیک با افزایش سـطوح پوترسـین، میـزان فعالیـت آنـزیم کاتالاز نسبت به نمونه شاهد روند افزایشـی معنـی‌داری را نشـان داد. امرایـی تبـار و همکـاران (Amraee-Tabar, Ershdi, & Robati, 2016) در بـــادام (*Prunus dulcis*) و هلـــو (*Prunus persica*) گزارش کردند که به‌کارگیری پوترسین سبب افـزایش مقـدار غلظـت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز گردیده است.

مقایسه میانگین اثر ساده تیمارهای نانوذرات آهن و پوترسـین در گیاه کاملینا نشان داد که بیشترین غلظت پراکسیداز در تیمار سطح ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن به میزان ۴/۹۶۹ میلی‌گـرم بـر گـرم به‌دست آمد که در مقایسه با سطح صفر نانوذرات آهن به میزان ۷۳/۴ درصد افزایش معنی‌دار نشان داد. بیشترین غلظت پراکسیداز با کـاربرد پوترسین در سطح ۱/۵ میلی‌مولار و به میزان ۴/۳۸۵ میلی‌گرم بر گرم به‌دست آمد که با افزایش ۳۵/۰ درصدی نسبت به تیمار سـطح صـفر پوتریسین (به میزان ۳/۲۴۷ میلی‌گرم در گرم)، اختلاف معنی‌داری بـا سطح ۱ میلی‌مولار پوتریسین نداشت (جـدول ۲). برومنـد سـیویری و همکـاران (Bromand-sivieri *et al.*, 2021) بـا بررسـی اثـر نـانو اکسید آهن و کود زیستی بر سیاهدانه گزارش نمودند که بـرهم‌کـنش محلول‌پاشی نانو اکسید آهن و کودهـای زیسـتی، اثـر معنـی‌داری بـر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و پلی فنول اکسیداز داشته و محلول‌پاشی میزان ۳ گرم نانو اکسید آهـن در لیتر، در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بسیار مـوثر واقـع شد. ایشان افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در غلظـت بـالای نانواکسید آهن را به افزایش گونـه‌هـای فعـال اکسـیژن در پاسـخ بـه سمیت آهن در گیاه نسبت دادند و با توجه به نقـش آهـن در فعالیـت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بیان داشتند که کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز و پلی‌فنول‌اکسیداز در سطح شـاهد بـه دلیل کمبود آهن در گیاه سیاهدانه می‌باشـد. از ایـن رو تعیـین میـزان مطلوب آن، از اهمیت بـه‌سـزایی برخـوردار اسـت (Yousefzadeh, Naghdi Badi, Sabaghaniya, & Jan Mommadi, 2016). در بررسـی سیدشـریفی و نریمـانی (Seyed Sharifi & Narimani, 2021) گزارش شد که با افـزایش غلظـت پوترسـین مـورد اسـتفاده، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بیشتر شده و کاربرد توام پوتریسین با کودهای زیستی به کاهش پراکسید هیدروژن تولید شده منجر شد.

نتایج مقایسه میانگین بـرهم‌کـنش تیمارهـای نـانوذرات آهـن و پوترسین نشان داد که در میـان ترکیبـات تیمـاری، بیشـترین غلظـت کلروفیـل a بـه‌ترتیـب در ترکیبـات تیمـاری ۶۰ قسـمت در میلیـون نانوذرات آهن با ۱/۵ میلی‌مـولار پوتریسـین و ترکیـب ۶۰ قسـمت در میلیون نانوذرات آهن با ۱ میلی‌مولار پوتریسین بـه‌ترتیـب بـا میـزان افزایش ۸۵ و ۷۱/۳ درصدی نسبت به تیمـار شـاهد، اخـتلاف آمـاری معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۳). مقایسه میانگین برهم‌کـنش دو عامل نشان داد که بیشترین میزان کلروفیل b و کلروفیـل کـل در ترکیب تیماری ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن بـا ۱ میلـی‌مـولار پوتریسین (به‌ترتیب ۷۳/۶ و ۷۳/۲ درصـد افـزایش نسـبت بـه تیمـار شـاهد) و کمتـرین میـزان کلروفیـل a و b و کـل (۰/۲۴۰، ۰/۶۷۰ و ۰/۹۱۰ میلی‌گرم بـر گـرم) در ترکیـب تیمـاری شـاهد مشـاهده شـد. بیش‌ترین مقـدار صـفت کارتنوئیـد در سـطح تیمـاری ۶۰ قسـمت در میلیون نانوذرات آهن (۲۱/۴ درصد افزایش نسـبت بـه تیمـار شـاهد) مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری بـا سـطح تیمـاری ۴۰ قسـمت در میلیون نانوذرات آهن نداشت. هم‌چنین بیشـترین مقـدار کارتنوئیـد در کاربرد سطح تیماری ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسـین مشـاهده شـد (۱۸/۵ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد) که اختلاف معنی‌داری با سطح ۱ میلی‌مولار پوتریسین نداشت (جدول ۲).

پلی‌آمین‌ها، هیدروکربن‌هایی با وزن مولکولی کم هسـتند کـه بـه دلیل خاصیت پلی‌کاتیونی می‌توانند با اتصـال بـه مـاکرومولکول‌هـای آنیونی شامل، فسفولیپیدها، اسیدهای نوکلئیـک و پـروتئین‌هـا باعـث ثبات بیولوژی غشا و ساختار سلول‌ها شوند (Alcázar *et al.*, 2006). پلی‌آمین‌های آلفاتیک مانند پوترسین، باعث کاهش تخریب کلروفیـل شده و منجر به دریافت بیشتر نور برای بهبود فتوسنتز می‌شوند. نتایج حاصل از داده‌ها نشـان داد بـه‌کـارگیری پوترسـین بـا بهبـود فعالیـت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و افزایش ظرفیـت مهـار رادیکـال‌هـای آزاد موجب کاهش نشت یونی و افزایش محتوای کلروفیل و کارتنوییـد در گیـاه اسـتویا (*Stevia Rebaudiana* B.) گردیـد (Gerami *et al.*, 2019). همچنین کاربرد پوترسین سبب افـزایش مقـدار کلروفیـل a و کلروفیل b در گیاه برنج (*Oryza sativa*) شد (Chattopadayay *et al.*, 2002) که با یافته‌های ایـن پـژوهش مطابقـت دارد. بـه عـلاوه مـاهروس و همکـاران (Mahros *et al.*, 2001) بیـان داشـتند به‌کارگیری پوترسین سبب افزایش مقدار کاروتنوئیـد در گیـاه داوودی (*Chrysanthemum indicum* L.) شده است که با یافتـه‌هـای ایـن پـژوهش مطابقـت دارد. افـزایش محتـوای کلروفیلـی بعـد از کـاربرد پوترسین به دلیل ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی آن‌هاست کـه از تخریـب

ساختار غشاء کلروپلاست جلوگیری می‌کنـد (Cohen, Popovic, & Zalik, 2004). در بررســی حســین و همکــاران (Hussein, EL-Gereadly, & El-Desuki, 2006) نیز کاربرد پوترسین بـا افـزایش تقسیم سـلولی و محتـوای هورمـون‌هـای گیـاهی از قبیـل اکسـین و جیبرلین و کاهش مقـدار اسـید آبسـیزیک موجـب افـزایش محتـوای کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید شد.

آهــن، بخشــی از گــروه کاتــالیزوری بســیاری از آنـزیم‌هــای اکسیداسیون و احیاء است و برای سنتز کلروفیل مورد نیاز است (Taiz & Zeiger, 2010). بررسی عسکری و همکاران (Askary, Amini, Talebi, & Shafiei Gavari, 2018) نشان داد که با افزایش سـطح آهن میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئیدهای گیاه یونجه (*Medicago sativa* L.) نسبت به شاهد (صفر آهن) افـزایش معنی‌داری را نشان می‌دهد. کمترین و بیشـترین شـاخص‌هـای فـوق به‌ترتیب در تیمار شاهد و غلظت ۲۵ میکرومولار نانوذرات اکسید آهن مشـاهده شـد. نتـایج پیونـدی و همکـاران (Peyvandi, Mirza, & Kamali Jamakani, 2012) نشان داد کاربرد کلات آهن در غلظـت کم (۱/۵ کیلوگرم در هکتار) و همه غلظت‌های نانو آهن (سه سطح ۱، ۳ و ۵ کیلـوگرم در هکتـار) موجـب افـزایش در غلظـت کلروفیـل a می‌شود. کاربرد کود نانو آهن در همه غلظت‌ها (سه سـطح ۱، ۳ و ۵ کیلوگرم در هکتار) در افزایش میزان کلروفیل b موثرتر از غلظت‌هـای کلات آهن بود.

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر ساده تیمارهای نانوذرات آهن و پوتریسین بر صفات فیزیولوژیکی گیاه کاملینا

Table 2- Mean comparison of iron nanoparticles and putricine treatment effect on physiological traits of Camelina

تیمار **Treatment**	پراکسیداز **Peroxidase (mg.g^{-1}FW)**	کاروتنوئید **Carotenoid (mg.g^{-1}FW)**
Fe N.P. ppm		
0	2.860^{c}	0.117^{b}
20	3.641^{b}	0.121^{b}
40	4.082^{b}	0.140^{a}
60	4.969^{a}	0.142^{a}
Putricine mM		
0	3.247^{c}	0.119^{b}
0.5	3.714^{bc}	0.121^{b}
1	4.206^{ab}	0.139^{a}
1.5	4.385^{a}	0.141^{a}

میانگین‌ها در هر ستون و برای هر عامل، که دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

The means, in each column and for each factor, that have at least one similar letter, according to the Duncan test at the level of 5% probability are not significantly different.

بیشترین درصد روغن در میان برهم‌کنش تیمارها در ترکیب تیمار ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱/۵ میلی‌مـولار پوتریسـین بـا میزان ۱۹/۵ درصد افزایش نسـبت بـه تیمـار شـاهد مشـاهده شـد و کمترین مقدار درصد روغـن در ترکیـب‌هـای تیمـاری ۴۰ قسـمت در میلیون نانوذرات آهن و صفر میلی‌مـولار پوتریسـین و ۴۰ قسـمت در میلیون نانوذرات آهن و ۰/۵ میلی‌مولار پوتریسین به‌ترتیـب بـا مقـدار ۹/۷ و ۹/۸ درصد افزایش نسبت بـه تیمـار شـاهد بـود کـه اخـتلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۳). پژوهشگران گـزارش کردنـد که در کلزا (*Brassica napus*) که گیاهی حسـاس بـه کمبـود آهـن بوده و کاربرد آهن به فرم نانوذرات حتی در غلظت‌های بالا اثر مثبتـی بر عملکرد دانه و درصد روغن خواهد داشت، تـأخیر در محلـول‌پاشـی (محلول‌پاشی در مراحل زایشی کلزا) غلظت آهن دانـه را افـزایش داد (Mohamadipoor *et al.*, 2013). گزارش شده که بـا مصـرف نـانو کلات آهن، عملکـرد روغـن، درصـد روغـن و درصـد پـروتئین دانـه آفتابگردان (*Helianthus annuus*) به‌طور معنی‌داری افزایش یافـت. به‌علاوه، بیشترین عملکرد و درصد روغن دانه آفتابگردان تحت تـأثیر تیمار محلول‌پاشی نانو کلات آهن در مرحله ساقه‌دهـی ایجـاد گردیـد (Moradizadeh, Shamsi, & Morovvati, 2013).

با بررسی درصد پروتئین در میان ترکیبات تیمـاری مـورد مطالعـه مشاهده شد که ترکیب تیماری ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین با دارا بودن میزان افـزایش ۱۰/۹ درصـدی نسبت به تیمار شاهد، بیشترین درصد پـروتئین را داشـته و همچنـین کمترین میزان درصـد پـروتئین در ترکیبـات تیمـاری ۲۰ قسـمت در میلیون نـانوذرات آهـن و ۱ میلـی‌مـولار پوتریسـین و ۶۰ قسـمت در میلیون نانوذرات آهن و ۰/۵ میلی‌مولار پوتریسین به‌ترتیب بـا ۲۲/۹ و ۲۳/۴ درصد بود که اختلاف معنی‌داری با همدیگر نداشتند (جدول ۳). در تحقیقات انجام شده توسط و بیگـی و همکاران (Beygi, Oveisi, & Tarigh eslami, 2011) گـزارش شـده اسـت کـه بـا افـزایش محلول‌پاشی کـود آهـن، عملکـرد دانـه و پـروتئین دانـه گیـاه سـویا (*Glycine max*) افزایش معنی‌داری داشته است. همچنین در حضـور کود آهن و نانو کود آهـن، تفـاوت معنـی‌داری در میـانگین محتـوای پروتئین برگ‌های ریحـان مشـاهده شـد (Peyvandi, Parande, &

.(Mirza, 2011

جدول ۳- مقایسه میانگین برهم‌کنش تیمارهای نانوذرات آهن و پوتریسین بر صفات فیزیولوژیکی در گیاه کاملینا

Table 3- Mean comparison of iron nanoparticles and putricine interaction effec on physiological traits of Camelina

نانوذرات آهن Iron nanoparticles ppm	پوتریسین Putricine mM	درصد پروتئین % Protein	درصد روغن % Oil	کاتالاز Catalase (mg.g^{-1}FW)	قند محلول Soluble sugar (mg.g^{-1}FW)	فلاونوئید Flavonoid (mg.g^{-1}FW)	کلروفیل کل Total Chl (mg.g^{-1}FW)	کلروفیل b Chl b (mg.g^{-1}FW)	کلروفیل a Chl a (mg.g^{-1}FW)
0	0	25.04^{b-d}	34.94^{g}	0.98^{d}	91.38^{f}	22.55^{hi}	0.910^{f}	0.670^{f}	0.240^{g}
0	0.5	24.71^{cd}	39.02^{de}	0.98^{d}	95.04^{f}	21.54^{i}	0.956^{ef}	0.680^{f}	0.279^{ef}
0	1	25.62^{b}	40.59^{b}	1.24^{cd}	117.79^{cd}	27.63^{ef}	1.086^{c-e}	0.790^{c-f}	0.292^{de}
0	1.5	24.84^{b-d}	39.42^{c-e}	1.20^{cd}	120.44^{b-d}	26.81^{e-g}	1.036^{de}	0.750^{d-f}	0.283^{e}
20	0	24.30^{de}	40.18^{bc}	0.98^{d}	100.61^{ef}	22.74^{g-i}	0.953^{ef}	0.703^{ef}	0.248^{fg}
20	0.5	25.39^{bc}	37.11^{f}	1.04^{cd}	108.83^{de}	21.22^{ef}	1.090^{c-e}	0.813^{c-e}	0.272^{ef}
20	1	22.94^{f}	40.61^{b}	1.34^{bc}	116.26^{cd}	27.36^{cd}	1.073^{c-e}	0.773^{d-f}	0.302^{de}
20	1.5	25.02^{b-d}	39.01^{de}	1.13^{cd}	113.35^{cd}	33.06^{d-f}	1.140^{b-d}	0.836^{cd}	0.300^{de}
40	0	24.87^{b-d}	38.34^{e}	1.28^{cd}	109.49^{c-e}	29.39^{f-h}	1.113^{cd}	0.793^{c-f}	0.320^{cd}
40	0.5	25.49^{bc}	38.38^{e}	1.18^{cd}	109.30^{de}	25.51^{f-h}	1.083^{c-e}	0.783^{c-f}	0.301^{de}
40	1	25.65^{b}	38.81^{de}	1.32^{c}	118.62^{b-d}	27.30^{e-g}	1.180^{bc}	0.823^{c-e}	0.355^{b}
40	1.5	27.77^{a}	41.76^{a}	1.83^{a}	135.27^{a}	34.42^{bc}	1.203^{bc}	0.850^{cd}	0.352^{bc}
60	0	24.72^{cd}	40.20^{bc}	1.29^{c}	129.98^{ab}	30.24^{c-e}	1.150^{b-d}	0.810^{c-e}	0.341^{bc}
60	0.5	23.35^{f}	40.85^{ab}	1.17^{cd}	129.29^{bc}	27.63^{ef}	1.260^{b}	0.903^{bc}	0.354^{b}
60	1	24.77^{cd}	39.91^{b-d}	1.64^{ab}	139.27^{a}	40.72^{a}	1.576^{a}	1.163^{a}	0.411^{a}
60	1.5	23.59^{ef}	39.01^{de}	1.92^{a}	136.97^{a}	38.77^{ab}	1.453^{a}	1.010^{b}	0.444^{a}

میانگین‌ها در هر ستون و برای هر عامل، که دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

The means, in each column and for each factor, that have at least one similar letter, according to the Duncan test at the level of 5% probability are not significantly different.

برهم‌کنش نانو ذره آهن و پوترسین بر تمامی صفات مورفولوژیکی کاملینا معنی‌دار بود. با بررسی مقایسه میانگین برهم‌کنش دو تیمار مشاهده شد که بالاترین میزان ارتفاع بوته در ترکیب تیماری ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱ میلی‌مولار پوتریسین با ۲۶/۲ درصد افزایش، اختلاف معنی‌داری با کمترین میزان ارتفاع در ترکیب تیماری سطح صفر نانوذرات آهن و پوتریسین داشت. سطح تیماری ۱ میلی‌مولار پوتریسین در ترکیب با سطوح تیماری نانوذرات آهن، بالاترین میزان ارتفاع را نشان داد (جدول ۴). زاهدی و علیپور (Zahedi & Alipour, 2018) بیان داشتند که محلول‌پاشی نانوکلات آهن و منگنز موجب افزایش ارتفاع ساقه اصلی جو (*Hordeum vulgare*) در شرایط آبیاری و کم‌آبیاری شد. افزایش ارتفاع به‌واسطه این دو کود مربوط به نقش این عناصر در فتوسنتز است که باعث افزایش ساخت کلروفیل در برگ‌های جوان و افزایش تنظیم‌کننده‌های رشد می‌شوند، در نتیجه فتوسنتز افزایش می‌یابد و مواد فتوسنتزی بیشتری به نقاط مختلف گیاه از جمله ساقه‌ها وارد می‌شود و در نهایت، ارتفاع گیاه افزایش می‌یابد (Malakouti & Tehrani, 1999). ترابیان و زاهدی (Torabian & Zahedi, 2013) بیان داشتند که تأثیر محلول‌پاشی سولفات آهن به شکل نانو ذرات بر ارتفاع، سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی بیشتر از تأثیر محلول‌پاشی این کود به شکل معمول آن بود. در آزمایش جبین و احمد (Jabeen & Ahmad, 2011) نیز با محلول‌پاشی عناصر پتاسیم، آهن و بور ارتفاع، وزن خشک اندام هوایی و غلظت آهن در اندام هوایی آفتابگردان افزایش یافت.

بررسی برهم‌کنش تیمارهای نانوذرات آهن و پوترسین بر وزن هزار دانه نشان داد که بیشترین میزان صفت را ترکیب تیماری ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن با ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین (با ۲۸/۴ افزایش نسبت به تیمار شاهد) به خود اختصاص داد که با تمام ترکیبات تیماری ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن با سطوح مختلف پوتریسین و نیز ترکیب تیماری ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن با ۰/۵ میلی‌مولار پوتریسین اختلاف معنی‌داری نداشت. همچنین ترکیب تیماری شاهد با میزان ۰/۹۹۳ گرم، کمترین وزن هزار دانه را نشان داد (جدول ۴). در آزمایشی گلخانه‌ای، کاربرد پودر نانواکسید آهن نسبت به اکسید آهن معمولی سبب افزایش معنی‌دار غلظت آهن گیاه، طول سنبله، ارتفاع گیاه، وزن دانه در سنبله، وزن خشک کل، وزن هزار دانه و وزن دانه گندم شد (Mazaherinia, Astaraei, Fotovat, & Monshi, 2010). همچنین گزارش شده است که کاربرد پوترسین باعث افزایش عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و وزن هزار دانه در گندم شده است (Gupta, Sharma, Gupta, &

(Kumar, 2003).

با بررسی نتایج حاصل از مقایسه میانگین برهم‌کنش تیمارهای نانوذرات آهن و پوتریسین بر صفات عملکردی در گیاه کاملینا نشان داده شد که بالاترین وزن خشک بوته کاملینا در ترکیبات تیماری ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن با ۱ میلی‌مولار پوتریسین و ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن با ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین به‌ترتیب با افزایش ۵۳/۷ و ۳۶/۵ درصدی نسبت به شاهد بوده که اختلاف آماری معنی‌داری با همدیگر نداشتند (جدول ۴). در مطالعه گیاه ذرت مشخص شد که کود عناصر کم مصرف از جمله آهن بیشتر در فعالیت‌های متابولیکی تأثیرگذار بوده و به‌طور غیرمستقیم با افزایش سرعت رشد گیاه، سطح جذب، دوام برگ و فتوسنتز باعث افزایش وزن خشک گیاه می‌شود (Sajedi, Ardakani, & Jafarzade, 2007). همچنین گزارش شده است که پوترسین باعث افزایش وزن خشک در حبوبات گردیده و استفاده از پوترسین و آمینواسید در افزایش رشد و عملکرد نتایج خوبی داشته است (Nassar *et al.*, 2003). به نظر می‌رسد دلیل احتمالی این افزایش عملکرد، اثر پوترسین در کاهش تخریب غشا سلولی و اندامک‌های درون سلولی و تولید متابولیت‌های ثانویه توسط گیاه مانند پرولین است که باعث افزایش پتانسل اسمزی گیاه و سبب افزایش قدرت جذب آب در شرایط نامساعد محیطی می‌باشد. پلی‌آمین‌ها با بهبود جذب عناصر مانند فسفر، پتاسیم و نیتروژن و کاهش غلظت سرب در گیاه، رشد و بهره‌وری را بهبود می‌بخشند (Rady, El-Yazal, Taie, & Ahmad 2016; Chen, Shao, Yin, Younis, & Zheng, 2019).

بررسی برهم‌کنش القاگرهای نانو ذره آهن و پوترسین بر صفت تعداد دانه در کپسول نشان داد که بیشترین تعداد دانه در ترکیب تیماری ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن با ۱ میلی‌مولار پوتریسین با ۱۷ دانه در کپسول و افزایش ۲۱/۴ درصدی نسبت به تیمار شاهد وجود داشت (جدول ۴). نتایج آقازاده خلخالی و همکاران (Aghazadeh-Khalkhali, Mehrafarin, Abdossi, & Naghdi Badi, 2015) نشان داد که کاربرد کود نانوکلات آهن اثر معنی‌داری بر صفت تعداد دانه در بوته گیاه اسفرزه (*Plantago psyllium* L.) داشته و با افزایش سطح تیمار تا ۲ گرم در لیتر، تعداد دانه در بوته افزایش معنی‌دار یافت. کمبود آهن در خاک‌های آهکی به کاهش معنی‌دار رشد و محصول گیاهان زراعی منجر می‌شود. این کاهش در برخی گیاهان زراعی مثل گندمیان، لگوم‌ها، سبزی‌ها و درختان میوه می‌تواند از ۲۵ درصد هم تجاوز کند (Briat *et al.*, 2007). همچنین محلول‌پاشی آهن اثر معنی‌داری بر تعداد بذر در کاپیتول و عملکرد دانه ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) داشت (Demirkiran, 2005).

جدول ٤- مقایسه میانگین برهم‌کنش تیمارهای نانوذرات آهن و پوتریسین بر صفات مورفولوژیکی در گیاه کاملینا

Table 4- Mean comparison of iron nanoparticles and putricine interaction effec on morphological traits of Camelina

نانوذرات آهن Iron nanoparticles ppm	پوتریسین putricine mM	وزن خشک بوته Dry weight (g)	وزن هزار دانه 1000 seed weight (g)	عملکرد Yield ($g.m^{-2}$)	دانه در کپسول Seed per capsule	ارتفاع Height (cm)
0	0	622.931^{b-e}	0.993^{h}	94.72^{g}	14.00^{b-d}	91.75^{f}
0	0.5	630.669^{b-e}	1.144^{c-f}	180.60^{a-d}	11.33^{ef}	109.50^{a-d}
0	1	570.552^{b-e}	1.112^{efg}	149.65^{b-f}	11.33^{ef}	113.75^{ab}
0	1.5	561.140^{b-e}	1.134^{def}	96.51^{fg}	10.00^{f}	107.50^{a-e}
20	0	502.840^{cde}	1.113^{efg}	187.37^{a-c}	13.66^{c-e}	98.25^{ef}
20	0.5	442.757^{cde}	1.155^{c-f}	119.59^{e-g}	11.33^{ef}	102.50^{c-f}
20	1	441.567^{c-e}	1.084^{fg}	191.28^{ab}	14.33^{bc}	106.25^{a-e}
20	1.5	543.963^{a-c}	1.205^{a-d}	183.56^{a-d}	16.33^{ab}	114.75^{a}
40	0	573.239^{b-e}	1.194^{a-e}	149.67^{b-f}	13.66^{c-e}	107.50^{a-e}
40	0.5	737.631^{a-c}	1.187^{a-e}	151.48^{b-e}	12.33^{c-f}	111.25^{a-c}
40	1	672.370^{b-e}	1.187^{a-e}	210.27^{a}	17.00^{a}	110.00^{a-d}
40	1.5	504.448^{bcd}	1.227^{a-c}	134.54^{c-g}	12.00^{c-f}	100.50^{d-f}
60	0	416.581^{e}	1.042^{gh}	178.70^{a-d}	14.33^{bc}	104.50^{b-f}
60	0.5	406.280^{e}	1.245^{ab}	200.27^{ab}	13.00^{c-e}	103.75^{c-f}
60	1	957.176^{a}	1.174^{b-e}	165.05^{a-e}	12.66^{c-e}	115.75^{a}
60	1.5	850.018^{ab}	1.275^{a}	133.08^{d-g}	11.66^{d-f}	108.75^{a-d}

میانگین‌ها در هر ستون و برای هر عامل، که دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

The means, in each column and for each factor, that have at least one similar letter, according to the Duncan test at the level of 5% probability are not significantly different.

جدول ۵- همبستگی صفات مورد مطالعه

Table 5- Correlation of studied traits

ردیف		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	ارتفاع بوته Height	1	0.04	0.23	0.26	0.19	0.23	0.05	0.37**	0.3**	0.34*	0.29*	0.36*	0.25	0.13	0.23
2	دانه در کپسول Seed per capsule		1	-0.18	0.01	0.06	0.32*	0.33*	-0.006	0.03	0.02	0.00	0.05	-0.16	-0.07	0.19
3	وزن هزار دانه 1000 seed weight			1	0.28	0.11	0.15	-0.41**	0.48**	0.37**	0.42**	0.51**	0.42**	0.38**	0.34*	0.37**
4	درصد روغن % Oil				1	0.04	0.40**	0.15	0.29*	0.26	0.28	0.39**	0.33*	0.46**	0.28	0.39**
5	درصد پروتئین % Protein					1	0.004	-0.11	-0.22	-0.005	-0.07	0.01	-0.001	-0.15	-0.19	-0.25
6	عملکرد Yield						1	0.44**	0.05	0.02	0.03	-0.06	0.002	-0.01	-0.15	0.26
7	وزن خشک بوته dry weight							1	-0.07	-0.23	-0.19	-0.09	-0.23	-0.16	-0.24	0.08
8	کلروفیل a Chl a								1	0.77**	0.88**	0.73**	0.78**	0.73**	0.76**	0.70**
9	کلروفیل b Chl b									1	0.98**	0.59**	0.70**	0.68**	0.61**	0.64**
10	کلروفیل کل Total Chl										1	0.66**	0.76**	0.73**	0.68**	0.69**
11	کاروتنویید Carotenoid											1	0.65**	0.69**	0.70**	0.59**
12	فلاونویید Flavonoid												1	0.70**	0.66**	0.62**
13	قند محلول Soluble sugar													1	0.72**	0.70**
14	کاتالاز Catalase														1	0.66**
15	پراکسیداز Peroxidase															1

** و * به‌ترتیب معنی‌داری در سطح یک و پنج درصد

** and * significant at 1 and 5 % level respectively

بیشترین عملکرد در واحد سطح در ترکیب تیمار ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱ میلی‌مولار پوتریسین به میزان ۲۱۰/۲۷۰ گرم در متر مربع مشاهده شده (افزایش بیش از دو برابری نسبت به شاهد) که اختلاف معنی‌داری با ترکیبات تیماری ۶۰ قسمت در

میلیون نانوذرات آهن و ۰/۵ میلی‌مولار پوتریسین و ۲۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱ میلی‌مولار پوتریسین به‌ترتیب با ۲۰۰/۲۷۷ و ۱۹۱/۲۸۲ گرم در متر مربع نداشت. کمترین میزان عملکرد نیز در ترکیبات تیماری سطح صفر نانوذرات آهن و پوتریسین (۹۴/۷۲۴ گرم در متر مربع) و سطح صفر نانوذرات آهن با ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین (۹۶/۵۱۹ گرم در متر مربع) مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۴). آهن نقش مهمی در واکنش‌های جابه‌جایی الکترون و تبادل انرژی دارد. آمالیوتیس و همکاران (Amaliotis, Velemis, Bladenopoulou, & Karapetsas, 2002) گزارش کردند که یک رابطه خطی معنی‌دار بین غلظت آهن و عملکرد گیاه وجود دارد. به طوری‌که در اثر مصرف آهن، مقدار کلروفیل، فتوسنتز و رشد رویشی گیاه افزایش یافته و این امر باعث افزایش سطح کربن‌گیری و درنتیجه میزان ماده خشک تولیدی در گیاه می‌شود. در رابطه با اثرگذاری کود آهن نانو بر گیاهان روغنی اظهار شده که افزایش غلظت کود نانوذرات آهن با بهبود وزن برگ، وزن اندام‌های هوایی، همچنین وزن خشک غلاف‌ها، عملکرد دانه سویا را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (Akk & Ilumae, 2005).

نتایج همبستگی صفات مورد مطالعه (جدول ۵) نشان داد که بیشترین مقایر همبستگی مثبت و معنی‌دار میان صفات فیزیولوژیکی وجود داشت. بر این اساس با افزایش هر یک از صفات فیزیولوژیکی مانند مقدار کلروفیل و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، دیگر صفات فیزیولوژیکی نیز افزایش می‌یابد. همچنین در میان ارتباطات صفات، عملکرد در واحد سطح همبستگی مثبت و معنی‌دار با صفت وزن خشک بوته (۰/۴۴)، درصد روغن (۰/۴۰) و تعداد بذر در کپسول (۰/۳۲) داشت. بالاترین همبستگی مثبت و معنی‌دار صفت درصد روغن با صفت میزان قند محلول (۰/۴۶) بود. صفت وزن هزار دانه به‌عنوان یک صفت موثر در عملکرد، با تمام صفات فیزیولوژیکی همبستگی مثبت و معنی‌داری داشته و فقط با صفت وزن خشک بوته همبستگی منفی و معنی‌دار (۰/۴۱−) نشان داد. صفت ارتفاع بوته با تمام رنگیزه‌های گیاهی و نیز میزان غلظت فلاونوئید همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که برهم‌کنش سطوح افزایشی نانوذرات آهن و پوتریسین سبب بهبود عملکرد و اجزای عملکردی کاملینا شد به طوری که بیشترین مقدار کارتنوئید در سطح ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و سطح ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین بود. بیشترین رنگیزه‌های کلروفیل b و کل، بیشترین فلاونوئید، قند محلول و ارتفاع بوته در ترکیب تیماری ۶۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱ میلی‌مولار پوتریسین، بیشترین درصد روغن و پروتئین در ترکیب تیماری ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین و بیشترین عملکرد دانه، تعداد دانه در کپسول و نیز میزان قابل‌توجه وزن هزار دانه و ارتفاع بوته در ترکیب تیماری ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱ میلی‌مولار پوتریسین مشاهده شد. همبستگی صفات نشان داد که بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار میان صفات فیزیولوژیکی بوده و صفت عملکرد همبستگی مثبت و معنی‌داری با وزن خشک بوته و درصد روغن داشت. به‌طورکلی ترکیب تیماری ۴۰ قسمت در میلیون نانوذرات آهن و ۱/۵ میلی‌مولار پوتریسین به‌عنوان بهترین ترکیب تیماری بوده و محلول‌پاشی محرک‌ها، موجب بهبود رشد، نمو و عملکرد کاملینا شد.

References

1. Aghazadeh-Khalkhali, D., Mehrafarin, A., Abdossi, V., & Naghdi Badi, H. (2015). Mucilage and seed yield of psyllium (*Plantago psyllium* L.) in response to foliar application of nano-iron and potassium chelate fertilizer. *Journal of Medicinal Plants*, *14*(56), 23-34. (In Persian). 20.1001.1.2717204.2015.14.56.4.1
2. Akk, E., & Ilumae, E. (2005). *Possibilities of growing Camelina sativa in ecological cultivation*. Estonian Research Institute of Agriculture, Teaduse 13, 75501, Saku, Estonia.
3. Alcázar, R., Marco, J. C., Cuevas, M., Patrón, A., Ferrando, P., Carrasco, A. F., Tiburcio, F., & Altabella, T. (2006). Involvement of polyamines in plant response to abiotic stress. *Biotechnology Letters*, *28*, 1867-1876. https://doi.org/10.1007/s10529-006-9179-3
4. Amaliotis, D., Velemis, D., Bladenopoulou, S., & Karapetsas, N. (2002). Leaf nutrient levels of strawberries (cv. Tudla) in relation to crop yield. *Acta Horticulturae*, *567*, 447-450. https://doi.org/10.17660/actahortic.2002.567.93
5. Amraee-Tabar, S., Ershdi, A., & Robati, T. (2016). The effect of putrescine and spermine on drought tolerance of almond and peach. *Journal of Crops Improvement*, *18*, 203-218. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jci.2016.56558
6. Armin, M., Akbari, S., & Mashhadi, S. (2014). Effect of time and concentration of nano-Fe foliar application on yield components of wheat. *International Journal of Biosciences*, *4*(9), 69-75. https://doi.org/10.12692/ijb/4.9.69-75
7. Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxide in betavulgaris. *Plant Physiology*, *24*, 1-15.
8. Askary, M., Amini, F., Talebi, M., & Shafiei Gavari, M. (2018). Effects of Fe-chelate and iron oxide nanoparticles

on some of the physiological characteristics of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *11*(2), 449-458, (In Persian). https://doi.org/10.22077/escs.2017.522.1104
9. Azad, H., Fakheri, B., Mahdinejhad, N., & Parmoon, Gh. (2018). The study the efficacy of drought stress and foliar application of nano iron chelated on antioxidant enzymes activity and yield flower in plant in chamomile genotypes (*Matricaria Chamomilla* L.). *Journal of Plant Process and Function, 7*(26), 223-238. (In Persian). https://doi.org/20.1001.1.23222727.1397.7.26.3.2
10. Bakhtiari, M., Moaveni, P., & Sani, B. (2015). The effect of iron nanoparticles spraying time and concentration on wheat. *Biological Forum-An International Journal, 7*(1), 679-683.
11. Berti, M., Gesch, R., Eynck, C., Anderson, J., & Cermak, S. (2016). Camelina uses, genetics, genomics, production, and management. *Industrial Crops Production, 94*, 690-710. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.034
12. Beygi, A., Oveisi, M., & Tarigh eslami, M. (2011). *Investigating the effect of drought stress and foliar application of iron fertilizer in the flowering stage on the amount of seed yield, protein and seed oil in soybean plant*. Conference on new achievements in the production of plants of oil origin. Bojnourd. Iran. (In Persian).
13. Bradford, M. M. (1976). Rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Analytical Biochemistry*, *72*, 248-254.
14. Briat, J. F., Curie, C., & Gaymard, F. (2007). Iron utilization and metabolism in plants. *Current Opinion in Plant Biology, 10*, 276-282. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.04.003
15. Briat, J. F., Dubos, C., & Gaymard, F. (2015). Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends in Plant Science, 20*(1), 33-40. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.005
16. Bromand-sivieri, M., Heydari, M., Gholami, A., & Ghorbani, H. (2021). Effects of biofertilizers and foliar application of iron oxide nanoparticle on grain yield and some physiological characteristics of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science, 51*(4), 73-83. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2020.125999.2542
17. Chattopadayay, M. K., Tiwari, B. S., Chattopadhayay, G., Bose, A., Sengupta, D. N., & Ghosh, B. (2002). Protective role of exogenous polyamines on salinity-stressed rice (*Oryza sativa*) plants. *Physiologia Plantarum, 116*, 192-199. https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2002.1160208.x
18. Chen, D., Shao, Q., Yin, L., Younis, A., & Zheng, B. (2019). Polyamine function in plants: Metabolism, regulation on development, and roles in abiotic stress responses. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 1945.
19. Chinnamuthu, C. R., & Boopathi, M. P. (2009). Nanotechnology and agroecosystem. *Plant Nutrition and Soil Science*, *168*, 558-573.
20. Cohen, A. S., Popovic, R. B., & Zalik, S. (2004). Effects of polyamines on chlorophyll and protein content, photochemical activity and chloroplast ultrastructure of barley leaf discs during senescence. *Plant Physiology, 64*(5), 717-720. https://doi.org/10.1104/pp.64.5.717
21. Couée, I., Hummel, I., Sulman, C., Gouesbet, G., & El-Amrani, A. (2004). Involvement of polyamines in root development. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, *76*, 1-10. https://doi.org/10.1023/a:1025895731017
22. Das, C., Sengupta, T., Chattopadhyay, S., Setua, M., & Das, N. (2002). Involvement of kinetin and spermidine in controlling salinity stress in mulberry (*Morus alba* L. cv. S1). *Acta Physiologiae Plantarum*, *24*, 53-57. https://doi.org/10.1007/s11738-002-0021-9
23. Demirkiran, A. R. (2005). Determination of Fe, Cu and Zn Contents of Wheat and Corn grains from different growing site. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, *8*(8), 1563-1567. https://medwelljournals.com/abstract/?doi=javaa.2009.1563.1567
24. Du, G., Li, M., Ma, F., & Liang, D. (2009). Antioxidant capacity and the relationship with polyphenol and vitamin C in Actinidia fruits. *Food Chemistry*, *113*(2), 557-562. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.025
25. El-Bassiouny, H. M., Mostafa, H. A., El-Khawas, S. A., Hassanein, R. A., Khalil, S. I., & Abd El- Monem, A. A. (2008). Physiological responses of wheat plant to foliar treatments with arginine or putrescine. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, *2*, 1390-1403.
26. Gerami, M., Mohammadian, A., & Akbarpour, V. (2019). The Effect of Putrescine and Salicylic Acid on Physiological Characteristics and Antioxidant in *Stevia Rebaudiana* B. Under Salinity Stress. *Journal of Crop Breeding*, *11*(29), 40-54. (In Persian). https://doi.org/10.29252/jcb.11.29.40
27. Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Polyamines and abiotic stress tolerance in plants. Plant Signal. *Behavior*, *5*, 26-33. https://doi.org/10.4161/psb.5.1.10291
28. Gupta, S., Sharma, M. L., Gupta, N. K., & Kumar, A. (2003). Productivity enhancement by putrescine in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Physiology and Molecular Biology of Plants, 9*, 279-282.
29. He, L., Nada, K., & Tachibana, S. (2002). Effects of spermidine pretreatment through the roots on growth and photosynthesis of chilled cucumber plants (*Cucumis sativus* L.). *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, *71*, 490-498. https://doi.org/10.2503/jjshs.71.490
30. Hiyasmin Rose, L., Benzon, M., Rosnah, U., Rubenecia, V. U., Litra, J. R., & Sang Chul, L. (2015). Nano fertilizer affects on the growth, development, and chemical properties of rice. *International Journal of Agronomy*

and Agricultural Research, *7*(1), 105-117.
31. Hussein, M. M., EL-Gereadly, N. H. M., & El-Desuki, M. (2006). Role of putrescine in resistance to salinity of pea plants (*Pisum sativum* L.). *Journal of Applied Science Research*, *2*(9), 598-604.
32. Ibrahim, F. M., & El Habbasha, S. F. (2015). Chemical composition, medicinal impacts and cultivation of camelina (*Camelina sativa*). *International Journal of Pharm Tech Research*, *8*, 114-122.
33. In, B. C., Motomura, S., Inamoto, K., Doi, M., & Mori, G. (2007). Multivariente analysis of realationbetween preharvest environmental factors, postharvest morphological and physiological factorsand vase life of cut Asomi Red Roses. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, *76*, 66-72. https://doi.org/10.2503/jjshs.76.66
34. Jabeen, N., & Ahmad, R. (2011). Effect of foliar-application boron and manganese on growth and biochemical activities in sunflower under saline conditions. *Pakestanian Journal of Botany*, *43*, 1271-1282.
35. Jafarpour, F., Bakhshi, D., Ghasem nejhad, M., & Hassan Sajedi, R. (2014). Effect of Putrescine on Postharvest Quality, and Phenolic Compounds and Antioxidant Capacity of Broccoli (*Brassica oleracea* L. cv. Italica) Florets. *Journal of Horticultural Science*, *28*(3), 303-311. (In Persian).
36. Jalil-Marandi, R. (2011). *Physiology of environmental stresses and resistance mechanisms in garden plants*. Two-volume course. First Edition. Urmia Academic Jihad Publications, Urmia (In Persian).
37. Kenneth, H. (1990). *Official Methods of Analysis* (AOAC). 15th Edition. Association of Official Analytical Chemist, Washington DC.
38. Lichtenthaler, H. (1987). Cholorophyllas and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods of Enzymology*, *148*, 350-382.
39. Liu, J. H., Wang, W., Wu, H., Gong, X., & Moriguchi, T. (2015). Polyamines function in stress tolerance: from synthesis to regulation. *Frontiers in Plant Science*, *6*, 827. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00827
40. Luck, H. (1974). In Methods in Enzymatic Analysis (ed. Bergmeyer, H.) p885. *Journal of Academic press*, New York.
41. Mahros, K. M., Badawy, E. M., Mahgoub, M. H., Habib, A., & El-Sayed, I. (2011). Effect of putrescine and uniconazole treatments on flower characters and photosynthetic pigments of (*Chrysanthemum indicum* L.) Plant. *Journal of American Science*, *7*(3), 399-408.
42. Malakoti, M. J., & Tehrani, M. M. (1999). *Effect of micronutriens on the Yield and Quality of Agricultural Products*. Tarbiat Modarres University Press, Tehran. (In Persian).
43. Marschner, H. (1995). *Mineral nutrition of higher plants*. Acadmic Press London pp: 313-323.
44. Mazaherinia, M. A., Astaraei, R., Fotovat, A., & Monshi, A. (2010). Effect of Nano iron oxide particles and on Fe, Mn, Zn, Cu concentrations in wheat plants. *World Applied Science*, *7*(1), 156-162.
45. McCready, R. M., Guggolz, J., Silviera, V., & Owens, H. S. (1950). Determination of starch and amylose in vegetables. *Analytical Chemistry*, *22*(9), 1156-1158.
46. Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, *7*, 405-410. https://doi.org/10.1016/s1360-1385(02)02312-9
47. Mohammadi, M., Majnoun Hosseini, N., & Dashtaki, M. (2016). Effects of nano-ferric oxide and zinc sulfate on chlorophyll, anthocyanin, flavonoid and leaf mineral elements of peppermint (*Mentha piperita* L.) at Karaj climatic conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 5(32), 770-784. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2016.107994
48. Mohamadipoor, R., Sedaghathoor, S., & MahboubKhomami, A. (2013). Effect of application of iron fertilizer in two methods foliar and soil application on growth characteristics of *Spathyphyllum illusion*. *European Journal of Experimental Biology*, *3*(1), 232-240.
49. Moradizadeh, M., Shamsi, V., & Morovvati, A. (2013). *The effect of using iron nanochelate on the performance of Sirna variety sunflower in the Meybod region*. The first national conference on sustainable development in arid and semiarid regions. Abarkouh. Yazd. (In Persian).
50. Mosavi, S. R., Galavi, M., & Ahmadvand, G. (2007). Effect of zinc and manganese foliar application on yield, quality and enrichment on potato (*Solanum tuberosum* L.). *Asian Journal of Plant Science*, *6*, 1256-1260. https://doi.org/10.3923/ajps.2007.1256.1260
51. Mustafavi, S. H., Badi, H. N., Sekara, A., & Al, E. (2018). Polyamines and their possible mechanisms involved in plant physiological processes and elicitation of secondary metabolites. *Acta Physiologiae Plantarum*, *40*, 102. https://doi.org/10.1007/s11738-018-2671-2
52. Naderi, M. R., & Abedi, A. (2012). Application of nanotechnology in agriculture and refinement of environmental pollutants. *Journal of Nanotechnology*, *11*(1), 18-26.
53. Nassar, A. H., El-Tarabily, K. A., & Sivasithamparam, K. (2003). Growth promotion of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by a polyamineproducing isolate of Streptomyces griseoluteus. *Plant Growth Regulation*, *40*, 97-106. https://doi.org/10.1023/a:1024233303526
54. Peyvandi, M., Mirza, M., & Kamali Jamakani, Z. (2012). The Effect of Nano Fe Chelate and Fe Chelate on the Growth and Activity of some *Satureja hortensis* Antioxidant. *New Cellular and Molecular Biotechnology Journal*,

2(5), 25-32. (In Persian). 20.1001.1.22285458.1390.2.5.3.2

55. Peyvandi, M., Parande, H., & Mirza, M. (2011). Comparison of nano Fe chelate with Fe chelate effect on growth parameters and antioxidant enzymes activity of *Ocimum Basilicum*. *New Cellular and Molecular Biotechnology Journal*, *4*, 89-99. (In Persian). 20.1001.1.22285458.1390.1.4.3.7
56. Rady, M. M., El-Yazal, M. A. S., Taie, H. A. A., & Ahmad, S. M. A. (2016). Response of wheat growth and productivity to exogenous polyamines under lead stress. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, *19*, 363-371.
57. Reis, R. S., Vale, E. M., Heringer, A. S., & Al, E. (2016). Putrescine induces somatic embryo development and proteomic changes in embryogenic callus of sugarcane. *Journal of Proteomics*, *130*, 170-179. https://doi.org/10.1016/j.jprot.2015.09.029
58. Sajedi, N., Ardakani, M., & Jafarzade, M. (2007). *Investigating the effect of different levels of nitrogen, iron and zinc on the growth and absorption of nutrients and protein percentage by fodder corn variety Single Cross 704 in Markazi Province*. 9th Iranian Congress of Agricultural Sciences and Plant Breeding. Tehran. Iran. (In Persian). https://civilica.com/doc/297703
59. Seyed Sharifi, R., & Narimani, H. (2021). Effect of biofertilizers and putrescine on biomass and some physiological and biochemical traits of vetch (*Vicia villosa Roth*) under rainfed condition. *Iranian Journal of Plant Biology*, *13*(3), 1-20. (In Persian). https://doi.org/10.22108/IJPB.2022.131436.1267
60. Sozer, N., & Kokini, J. L. (2008). Nanotechnology and its application in the food sector (Review). *Trends in Biotechnology*, *27*(2), 82-89. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2008.10.010
61. Srivastava, N., Srivastava, M., Manikanta, A., Singh, P., Ramteke, P. W., Mishra, P. K., & Malhotra, B. D. (2017). Production and optimization of physicochemical parameters of cellulase using untreated orange waste by newly isolated Emericella variecolor NS3. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *183*, 601-612. https://doi.org/10.1007/s12010-017-2561-x
62. Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology*. 5th edition. Sinauer Associates Inc. Sunderland.
63. Torabian, Sh., & Zahedi, M. (2013). Effects of Foliar Application of Common and Nano-sized of Iron Sulphate on the Growth of Sunflower Cultivars under Salinity. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *44*(1), 109-118. (In Persian). https://doi.org/10.22059/IJFCS.2013.30488
64. Van Acker, S. A. B. E., Tromp, M. N. J. L., Haenen, G. R. M. M., Van Der Vijgh, W. J. F., & Bast, A. (1995). Flavonoids as scavengers of nitric oxide radical. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, *214*, 755-759. https://doi.org/10.1006/bbrc.1995.2350
65. Verma, S., & Mishra, S. N. (2005). Putrescine alleviation of growth in salt stressed Brassica juncea by inducing antioxidative defense system. *Journal of Plant Physiology*, *162*, 669-677. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.08.008
66. Willekens, H., Chamnongpol, S., Davey, M., Schraudner, M., Angebartels, C., Van Montagu, M., & VanCamp, W. (1997). Catalase is a sink for H_2O_2 and is indispensable for stress defense in C3 plants. *The EMBO Journal*, *16*, 4806-4816. https://doi.org/10.1093/emboj/16.16.4806
67. Xie, Z., Jiag, D., Dai, T., Jing, Q., & Cao, W. (2004). Effects of exogenous ABA and cytokinin on leaf photosynthesis and grain protein accumulation in wheat ears cultured in vitro. *Plant Growth Regulation*, *44*, 25-32. https://doi.org/10.1007/s10725-004-1880-4
68. Yousefzadeh, S., Naghdi Badi, H. A., Sabaghaniya, N., & Jan Mommadi, M. (2016). The Effect of foliar application of nano-iron chelate on physiological and chemical traits of dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.). *Journal of Medicinal Plants*, *4*(60), 152-160. (In Persian).
69. Zahedi, H., & Alipour, A. (2018). Effect of spraying of iron and manganese nano chelated on yield and yield component of barley (*Hordeum vulgare* L.) under water deficit stress at different growth stages. *Journal of Applied Crop Research*, *11*(4), 847-861. (In Persian). https://doi.org/10.22077/escs.2018.890.1176